



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

Balanço Térmico de Estufas

**Texto de apoio às aulas de Condicionamento Ambiental e de Projectos
de Engenharia Agronómica**

Fátima Baptista

Dezembro 2018

Índice

	Página
Introdução	3
Por que é tão importante o controlo climático na produção em estufa?	4
Balanço térmico de estufas	6
Considerações finais	12
Referências bibliográficas	13

Introdução

As estufas são utilizadas desde que o homem tentou criar plantas em locais ou em épocas onde as condições climáticas exteriores lhes eram adversas. São instalações cuja envolvente é parcialmente transparente à radiação solar e com as quais se pretende melhorar as condições ambientais para a produção de plantas. Trata-se provavelmente do exemplo mais notável do modo como o Homem actua no ambiente físico das plantas de forma a assegurar ou aumentar a quantidade e qualidade da produção. A evolução deste tipo de construção ocorreu essencialmente na década de 60, aquando da realização dos primeiros ensaios sobre plásticos agrícolas.

Existem várias definições de estufa segundo diferentes autores. Monteiro (1983) refere que *“As estufas são estruturas cobertas com um material transparente ao espectro visível, delimitando um espaço susceptível de ser fechado, que se utiliza para o crescimento de plantas, permitindo o trabalho de pessoas no seu interior”*.

As estufas usadas nas zonas de clima Mediterrânico são na sua maioria estufas simples cobertas com materiais plásticos, não aquecidas, sendo a ventilação a técnica de controlo ambiental que permite controlar a temperatura, humidade e nível de CO₂ do ar. As estufas utilizadas na Europa do Norte são geralmente de vidro, com elevado nível tecnológico, com aquecimento, écran térmico, iluminação artificial, injeção de CO₂ e sistema de controlo automatizado.

As condições ambientais no interior de uma estufa afectam directa e indirectamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Assim, o conhecimento das necessidades das plantas é indispensável uma vez que estas são sensíveis à luz, teor de dióxido de carbono e de oxigénio, temperatura, humidade e movimentação do ar. Estes factores interferem com as plantas através de três mecanismos bem conhecidos: fotossíntese, respiração e transpiração. As exigências climáticas das plantas dependem de factores como: a espécie, o estado fisiológico, as condições climáticas locais, o sistema de produção e a experiência do produtor. Importa também referir que o crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como o aparecimento de pragas e doenças está estritamente relacionado com as respostas biológicas às condições ambientais.

Um dos principais objectivos da produção de plantas em estufa é criar e manter as condições óptimas para o seu desenvolvimento, de forma a possibilitar o aumento do rendimento dos produtores. Os custos de investimento, do trabalho e energéticos são superiores aos verificados em produção ao ar livre. A maneira de compensar este aspecto é utilizar da melhor maneira possível o potencial produtivo das plantas e melhorar a eficiência do trabalho e da utilização de energia.

Pretende-se com as técnicas de controlo ambiental criar as condições ambientais requeridas pelas plantas em produção, de maneira a assegurar a rentabilidade económica, tendo em conta o objectivo comercial e as condições climáticas da zona. Em contraste

com a maioria dos sistemas de produção em agricultura, a produção em estufa permite manipular o crescimento e a produtividade (até certos limites) das culturas através da utilização de técnicas de produção e de condicionamento ambiental correctas. Os factores ambientais a controlar no interior de uma estufa são a luz, a temperatura, a humidade e os teores de oxigénio e de dióxido de carbono.

A produção em estufa apresenta algumas vantagens relativamente à produção ao ar livre, como sejam a precocidade, a possibilidade de obter colheitas fora de época, o prolongar o ciclo de produção, o aumento do rendimento por unidade de área, a melhoria da qualidade, a economia da água de rega, o maior controlo de pragas e doenças, a protecção das plantas das condições climáticas adversas e a possibilidade de assegurar melhores condições de trabalho.

A maximização da produção é conseguida através da conjugação de vários factores, como a utilização de variedades adequadas, controlo ambiental (temperatura, humidade, luz e CO₂) e o recurso a técnicas culturais apropriadas (sementeira, regas, fertilização, etc.).

Por que é tão importante o controlo climático na produção em estufa?

As técnicas de controlo ambiental como a ventilação, arrefecimento, sombreamento e aquecimento permitem controlar a temperatura e humidade do ar, bem como a concentração de CO₂, velocidade do ar e o nível de radiação. O clima nas regiões Mediterrânicas caracteriza-se por Inverno ameno e húmido e Verão quente e seco. Nestas condições é necessário aquecer? Ou arrefecer? Ou ventilar? No que diz respeito à ventilação, em estufas não aquecidas onde habitualmente não se utiliza a injeção de CO₂, a ventilação permite repor o nível de CO₂, fundamental para a fotossíntese.

Relativamente às necessidades de arrefecimento estas dependem da cultura e da zona de produção. De facto, na maior parte das regiões Mediterrânicas a produção em estufa durante o Verão implica recorrer a técnicas de arrefecimento, o que acarreta custos energéticos, compensados em determinadas culturas com alto valor de mercado. Em Portugal, na zona Oeste onde as condições climáticas são mais amenas, é possível produzir durante o Verão somente com recurso à ventilação por vezes combinada com técnicas de sombreamento que ajudam no controlo da temperatura.

E no que se refere ao aquecimento? Tal como mencionado, nas regiões Mediterrânicas, a maior parte das estufas são não aquecidas. Nestas condições para muitas das culturas o aumento da produtividade não compensa o investimento. No entanto, depende da cultura e da estratégia do produtor. De facto, o recurso ao

aquecimento permite antecipar a produção e melhorar a qualidade, pelo que em algumas situações o investimento no sistema de aquecimento é compensador.

Na tabela seguinte encontram-se os resultados de um estudo no qual se pretendeu avaliar (através de balanço térmico) as temperaturas do ar (máxima e mínima) para uma estufa localizada em vários locais na península Ibérica caso não se utilize nenhum sistema de climatização (sem ventilação, sem aquecimento, sem arrefecimento). Se considerarmos que para a maioria das culturas produzidas em estufa a temperatura óptima do ar deve situar-se entre 14 e 26°C (Valera et al., 2008), facilmente percebemos a importância das técnicas de controlo ambiental na produção em estufa. De facto, os valores estimados para os vários locais estão claramente fora deste intervalo. Sem recorrer a ventilação, sombreamento ou arrefecimento a temperatura máxima atinge valores entre 46°C e 54°C na Corunha e Madrid, respectivamente. Já no caso da temperatura mínima, sem aquecimento, estimam-se valores entre 1°C e 13°C para Madrid e Madeira. Apenas nos Açores e na Madeira se estimam valores superiores a 10°C.

Estes resultados mostram que sem recurso às técnicas de condicionamento ambiental a produção é muito difícil em todas as regiões, pelo menos durante parte do ano. Os sistemas de climatização (aquecimento, arrefecimento, ventilação, etc.) devem ser correctamente dimensionados tendo em conta as características climáticas da zona onde se localiza a produção, as condições desejadas no interior, as características da construção e dos equipamentos de climatização.

Temperatura máxima e mínima estimadas para estufas de tomate sem recurso a equipamentos de climatização (Baptista et al., 2012)

Local	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)
Açores	51,8	10,9
Faro	53,1	8,0
Madeira	51,4	12,6
Torres Vedras	52,0	7,6
Vila do Conde	51,6	6,6
Almeria	52,7	6,5
Castellon	53,1	3,9
Corunha	46,2	5,8
Huelva	53,6	6,8
Madrid	53,9	0,5
Navarra	47,9	1,2

Balanço térmico de estufas

O balanço térmico, como o próprio nome indica, é um balanço entre ganhos e perdas de calor que ocorrem num determinado intervalo de tempo, em dada instalação. Este método permite estimar as necessidades de ventilação ou de aquecimento necessárias para obter determinadas condições no interior da estufa (Walker *et al.*, 1983; Baptista, 2007). Além disso, permite prever as condições de temperatura, conhecendo o caudal de ventilação e as condições exteriores.

Uma estufa está sujeita às variações climáticas que ocorrem no exterior ao longo do dia e do ano. Há momentos em que a estufa ganha e outros em que perde calor, através de diferentes processos de transferência. Quer os ganhos quer as perdas de calor modificam o nível energético do sistema, o que se manifesta pela alteração da temperatura. O conhecimento da dinâmica energética de uma estufa é importante para identificar pontos críticos, de modo a evitá-los através da utilização correcta de técnicas de condicionamento ambiental.

A técnica do balanço energético, assume pelo princípio da conservação da energia, que os ganhos de calor são iguais às perdas e portanto a soma destes é nula. No entanto, Takakura (1991) refere que o balanço energético num determinado volume não é igual a zero, mas proporcional a $\frac{\Delta T}{\Delta t}$, o que significa que existe uma pequena variação de temperatura num dado intervalo de tempo. Segundo Walker *et al.* (1983) e Matallana e Montero (1989) admite-se que a temperatura interior é superior à temperatura exterior.

As trocas de calor entre o interior e o exterior de uma estufa envolvem mecanismos complexos, relacionados entre si, onde interferem todas as formas de transferência de calor. As trocas de calor sensível dão-se essencialmente por radiação, condução e convecção.

A equação geral do balanço térmico, segundo Walker *et al.* (1983) e Carrasco *et al.* (1984a) é a seguinte:

$$Q_I + Q_R + Q_P + Q_f = \pm(Q_{cc} + Q_g) + Q_{SV} + Q_{LV} + Q_i + Q_{IF} + Q_{FO}$$

sendo Q_I os ganhos de calor devido à radiação solar, Q_R os ganhos de calor devido à respiração das plantas, Q_P os ganhos de calor devido ao aquecimento, Q_f os ganhos de calor devido ao equipamento, Q_{cc} as trocas por condução-convecção, Q_g as trocas de calor com o solo, Q_{SV} as perdas de calor sensível devido à ventilação, Q_{LV} as perdas de calor latente devido à ventilação, Q_i as perdas de calor por infiltração, Q_{IF} as perdas por radiação térmica e Q_{FO} as perdas de calor devido à fotossíntese.

Cada termo desta equação é definido por uma fórmula que permite a sua quantificação para determinadas condições, sendo possível determinar experimentalmente todos excepto as perdas por convecção. Alguns dos termos desta equação são muito pequenos em relação aos outros e por isso são normalmente desprezados. É o caso do calor de respiração que representa cerca de 1/8 a 1/10 da energia associada à fotossíntese, e mesmo esta é apenas cerca de 3 % da radiação solar que incide nas folhas, pelo que também é considerada nula (Walker *et al.*, 1983; Carrasco *et al.*, 1984a).

As transferências de calor com o solo podem ser ganhos ou perdas, dependendo se a temperatura da estufa é menor ou maior que a do solo. De qualquer das formas, é sempre um valor muito baixo quando comparado com as trocas pela envolvente. No entanto, pode ser importante como fonte de calor durante a noite em estufas não aquecidas, pois emite radiação térmica que determina a dinâmica do sistema (Walker *et al.*, 1983; Bot, 1991; Carrasco *et al.*, 1984a). Segundo Mancini *et al.* (1984) (*cit. in* Matallana e Montero, 1989), as trocas de calor com o solo variam com o tipo de solo e com o seu conteúdo em humidade. Como regra prática este autor considera que as perdas pelo solo representam cerca de 5 a 10 % das restantes perdas.

Os ganhos de calor devido ao sistema de aquecimento são contínuos quando o sistema está em funcionamento, sendo o calor fornecido determinado pelas características do equipamento.

A infiltração é o movimento natural do ar através de pequenas aberturas nas junções dos elementos da envolvente devido à acção do vento e da impulsão térmica. As perdas de calor por infiltração são de uma forma geral muito pequenas quando comparadas com as perdas de calor devido à ventilação e através da envolvente, razão pela qual são na maior parte das situações consideradas nulas. Importa, no entanto, referir que em estufas de fraca estanqueidade as perdas por infiltração podem ser significativas, devendo nesse caso ser contabilizadas aquando dos cálculos do balanço térmico.

As perdas por radiação térmica, emitida pelo solo e pelas plantas, são muito importantes sobretudo quando o material de cobertura é o polietileno normal, assumindo especial significância no balanço térmico nocturno em noites sem nebulosidade.

Em resumo, existem duas situações distintas para o cálculo do balanço térmico numa estufa. Um período diurno, em que os ganhos de calor são sobretudo devido à radiação solar e um período nocturno, em que as perdas são essencialmente por condução através da envolvente e por radiação térmica. As equações simplificadas para o balanço diurno e nocturno são respectivamente:

$$Q_I = \pm Q_{cc} + Q_{SV} + Q_{LV}$$

$$Q = Q_{IF} + Q_{cc} + Q_{SV} + Q_g$$

Ganhos de calor devido à radiação solar

A energia solar é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. A fotossíntese ocorre devido à absorção da radiação fotossinteticamente activa, PAR (Photosintetic Active Radiation), pela clorofila das plantas. Assim, os materiais de cobertura das estufas devem apresentar elevada transmissão à PAR (comprimento de onda entre 400 e 700 nm) e também à radiação solar directa e difusa.

A radiação solar divide-se em radiação directa e difusa, sendo a primeira a radiação que atinge directamente a superfície terrestre sem sofrer reflexão ou difusão ao atravessar a atmosfera. A radiação difusa é a parte que chega à terra após a difusão sofrida ao atravessar as camadas da atmosfera. Em dias claros a maior parte da radiação é directa. A transmissão à radiação directa é função das propriedades radiométricas do material de cobertura e do ângulo de incidência na superfície da envolvente, o que está relacionado com a posição do sol. Esta é função da latitude, época do ano, hora do dia, orientação e geometria da construção.

Os cálculos para determinar a energia ganha devido à radiação solar são efectuados com base nas leis da óptica para a reflexão, absorção e transmissão. Deste modo, as propriedades radiométricas do material de cobertura, o ângulo de incidência da radiação e a geometria da construção são factores que necessariamente têm de ser conhecidos. Segundo Walker *et al.* (1983) os ganhos de calor devido à radiação solar podem ser definidos por:

$$Q_I = \tau I A_f$$

$$I = (c + \text{sen}\beta) a e^{-\frac{b}{\text{sen}\beta}}$$

A intensidade da radiação solar (I), varia com a latitude e durante o dia à medida que o sol sobe no horizonte. O manual da ASHRAE (1981) apresenta uma tabela com os valores de a , b e c , constantes dependentes do local e da época do ano, com os quais se determina a radiação solar à superfície da terra para o vigésimo primeiro dia de cada mês (Tabela 2). O ângulo β é a altura do sol, função da época do ano, podendo encontrar-se este valor nas tabelas de azimuth, considerando que o máximo ganho de calor devido à radiação solar ocorre ao meio dia solar, pelo que as necessidades de ventilação são normalmente calculadas para essa hora. A transmissão à radiação solar (τ), em função do material de cobertura encontra-se no Tabela 3. A_f é a área da estufa em planta.

Tabela 2 - Constantes para o cálculo da radiação solar (ASHRAE, 1981)

Data	a (W/m ²)	b	c
21 Janeiro	1230	0.142	0.058
21 Fevereiro	1214	0.144	0.060
21 Março	1185	0.156	0.071
21 Abril	1135	0.180	0.097
21 Maio	1104	0.196	0.121
21 Junho	1088	0.205	0.134
21 Julho	1085	0.207	0.136
21 Agosto	1107	0.201	0.122
21 Setembro	1151	0.177	0.092
21 Outubro	1192	0.160	0.073
21 Novembro	1120	0.149	0.063
21 Dezembro	1233	0.142	0.057

Tabela 3 - Transmissão de vários materiais de cobertura à radiação solar total, radiação térmica, PAR e coeficiente de transmissão térmica global (Valera et al., 2008)

Tipo de filme	Transm. rad. solar (%)	Transm. rad. térmica (%)	PAR (%)	U (W/m ² °C)
PE	88-91	79- 84	88-91	9,1
PE duplo	83	84	66	6,8
PE térmico	89	10	90	8,6-13
Vidro	89	0	91	6,7
Vidro duplo	72	0	82	3,2
EVA	89-91	39-55	90-92	7,8
PE-EVA-PE	82-89	38	82-85	8,8-10,4

Trocas de calor por condução-convecção

Estas transferências de calor podem representar ganhos ou perdas para o sistema num determinado momento, dependendo da temperatura dos componentes que interferem neste processo. Assim, supondo que a temperatura no interior da estufa é superior à temperatura exterior, ocorrerão perdas de calor do meio interior para o

exterior através do material da envolvente e o oposto acontece se a temperatura exterior for superior.

Os materiais de cobertura das estufas são em regra de baixa espessura, o que facilita as trocas por condução-convecção entre a envolvente e o meio exterior. Durante o Inverno estas perdas são bastante significativas, recorrendo-se a várias técnicas de modo a reduzi-las, como é o caso da utilização de filmes duplos ou triplos e de écrans térmicos. A cobertura dupla consiste em duas camadas de filme com um espaço de ar entre si (< 5 cm) que aumenta a resistência térmica da envolvente. São utilizadas em zonas frias de modo a evitar as temperaturas interiores muito baixas. A cobertura dupla tem influência na temperatura, menores perdas de calor por condução-convecção, maiores perdas de luminosidade e a condensação quando ocorre é no interior (parte interior da lâmina exterior) e logo não existe o perigo de cair sobre as plantas.

A figura seguinte esquematiza as trocas de calor por condução-convecção que ocorrem numa estufa, sendo de destacar as trocas que ocorrem no interior da estufa, as trocas na parte exterior do material de cobertura e as trocas entre o interior e o exterior.

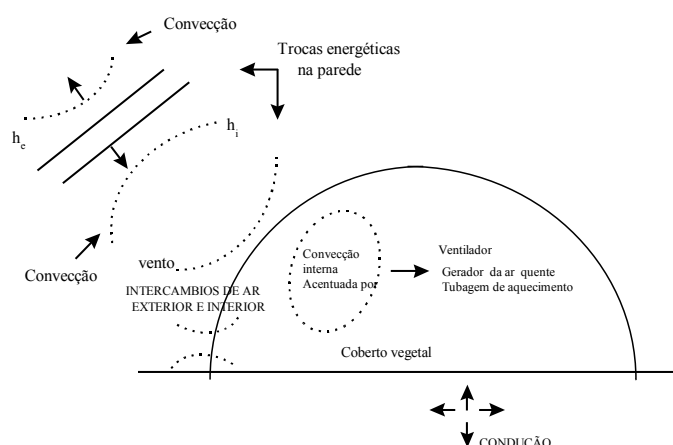


Figura 1 - Trocas energéticas por condução-convecção numa estufa (adaptado de Matallana e Montero, 1989)

As trocas de calor por condução-convecção podem calcular-se da seguinte forma:

$$Q_{cc} = A_{cob} U (T_i - T_o)$$

O coeficiente global de transmissão térmica (U), é função dos coeficientes de convecção interior e exterior (h_i e h_o), da condução no interior da parede de espessura (e) e do coeficiente de condutibilidade térmica k do material. Determina-se do seguinte modo (Carrasco *et al.*, 1984a):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{e}{k}}$$

Valera *et al.* (2008) apresentam valores para o U para vários materiais de cobertura (Tabela 3).

Trocas de calor devido à renovação de ar

A ventilação é um dos factores com maior importância nas perdas de calor de uma estufa, removendo calor sensível e latente (Walker *et al.*, 1983; Carrasco *et al.*, 1984^a; Baptista, 2007):

$$Q_{REN} = Q_{SV} + Q_{LV}$$

$$Q_{SV} = CV\mu c\Delta T \quad \text{e} \quad Q_{LV} = EFQ_I$$

sendo CV o caudal de ventilação, μ a massa volúmica do ar à temperatura interior, c o calor específico do ar, E a razão entre a energia associada à evapotranspiração das plantas em crescimento e a radiação solar, sendo em estufas normalmente recomendado o valor de 0.5 (Walker *et al.*, 1983). F (%) é o nível de ocupação da estufa, variável ao longo do ciclo cultural.

As perdas por calor latente resultam da transpiração das plantas e evaporação do solo, que é função da quantidade de radiação que lhes chega e da consequente evaporação de água. A transpiração das plantas contribui para os balanços energético e de massa numa estufa, afectando a temperatura e a humidade. A evapotranspiração é devida essencialmente a duas forças: radiação solar directa e défice de pressão do vapor de água entre as folhas e o meio ambiente.

Perdas de calor por radiação térmica

Numa estufa, as trocas por radiação térmica são essencialmente entre o solo, as plantas, materiais de estrutura e de cobertura e a atmosfera circundante. Pode ser um factor extremamente importante quando o material de cobertura é muito permeável à radiação de comprimento de onda longo, como é o caso do polietileno normal.

Walker *et al.* (1983) calculam as perdas por radiação térmica através da seguinte equação:

$$Q_{IF} = \varepsilon_s \tau_t A_f \sigma (T_i^4 - \varepsilon_a T_o^4)$$

Sendo ε_a a emissividade aparente da atmosfera, que é função da temperatura do ponto de orvalho da atmosfera (Tabela 4). A transmissão à radiação térmica (τ_t) para os

diferentes materiais de cobertura encontra-se no Tabela 3. ε_s é a emissividade das superfícies interiores, que se considera igual a 0.85. σ é a constante de Stefan-Boltzman, igual a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Tabela 4 - Emissividade aparente da atmosfera (Walker *et al.*, 1983)

Temperatura do ponto de orvalho da atmosfera (°C)	Emissividade aparente (ε_a)
- 17.8	0.730
- 6.7	0.775
4.4	0.818
15.6	0.858
26.7	0.883

A temperatura e emissividade do céu têm grande influência sobre a temperatura das plantas, devido às perdas por radiação térmica durante a noite. É essencialmente neste aspecto que se verifica a maior diferença de comportamento radiométrico entre os diferentes materiais de cobertura. O vidro é sem dúvida o material com menor transmissão à radiação de comprimento de onda longo. Pelo contrário o polietileno normal é o material mais transparente a estas radiações.

Assim, não é de estranhar que quando o material de cobertura é o polietileno normal possam existir momentos durante a noite (principalmente noites claras), em que a temperatura interior é alguns graus inferior à temperatura exterior, fenómeno designado por inversão térmica. Nesta situação as trocas por condução-convecção com a envolvente são ganhos de calor e a radiação emitida pelo solo têm muita importância no balanço energético.

Considerações finais

O microclima de uma estufa está directamente dependente das condições climáticas do meio exterior e das técnicas de condicionamento ambiental utilizadas. Do ponto de vista do engenheiro o controlo ambiental de estufas é complexo devido ao tempo de resposta do sistema. Os materiais de cobertura são normalmente muito finos, permitindo elevada transmissão da radiação solar, mas apresentam o inconveniente de possibilitarem que alterações na temperatura exterior e nas características do vento rapidamente influenciem as condições interiores.

Ao efectuar os cálculos do balanço térmico numa estufa três situações podem ocorrer:

1. a temperatura interior é inferior ao valor pretendido, e nesse caso é necessário recorrer à utilização de técnicas de aquecimento;
2. a temperatura é superior ao desejado, sendo necessário recorrer a técnicas de arrefecimento, como a ventilação natural ou forçada associada a arrefecimento evaporativo ou a redução dos ganhos de calor devido à radiação solar (sombreamento);
3. o balanço está equilibrado e não é necessário actuar ao nível do condicionamento ambiental.

Referências bibliográficas

- ASHRAE, 1981. *Guide and Data Book Fundamentals*. American Society of Heating and Air Conditioning Engineers. New York.
- BAPTISTA F.J. 2007. Modelling the Climate in Unheated Tomato Greenhouses and predicting *Botrytis cinerea* infection. PhD Thesis, Évora University, 180 pp.
- BAPTISTA F.J., SILVA A.T, L. M. NAVAS, GUIMARÃES A.C. and MENESES J.F. 2012. Greenhouse Energy Consumption for Tomato Production in the Iberian Peninsula Countries. *Acta Horticulturae* 952:409-416
- BOT, G. P. A., 1991. Physical modeling of greenhouse climate. *IFAC Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, 7-12.
- CARRASCO, O.; OSSANDON, E.; VILLA, R. and ACEVEDO, E., 1984a. Balances energeticos en invernadero de polietileno I. Aspectos teoricos. *Simiente*, 54(3):190-193.
- CARRASCO, O.; OSSANDON, E.; VILLA, R. and ACEVEDO, E., 1984b. Balances energeticos en invernadero de polietileno II. Resultados experimentales. *Simiente*, 54(3):68-75.
- MATALLANA, A. and MONTERO, J. I., 1989. *Invernaderos - Diseño, Construcción y Ambientación*. Ed. Mundi - Prensa, Madrid, 159 pp.
- MONTEIRO, A. J. S. A., 1983. Estufas horticolas no Algarve- Aspectos pertinentes para a sua construção. Estudo destinado à obtenção do grau de Doutor, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 50 pp.
- TAKAKURA, T., 1991. Environmental control systems for greenhouses. *Proceed. of the 21st Century Symposium ASAE*, 1-10.
- VALERA D., MOLINA F.D. e ÁLVAREZ A.J. 2008. Ahorro y eficiencia energética en invernaderos. IDEA, Madrid. 66 pp.
- WALKER, J. N.; ALDRICH, R. A. and SHORT, T. H., 1983. Quantity of air flow for greenhouse structures. *In Ventilation of Agricultural Structures*. Ed. by Hellickson and Walker. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan. 372 pp.